

УДК 550.3

## МОНИТОРИНГ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ВОДОХРАНИЛИЩ КРУПНЫХ ГЭС

**Кабанов А.А.<sup>1</sup>, Денисенко А.В.<sup>2</sup>, Бурцев А.А.<sup>1</sup>****научный руководитель д-р техн. наук Симонов К.В.**<sup>1</sup>*Сибирский федеральный университет*<sup>2</sup>*Институт вычислительного моделирования СО РАН*

Усиление в последние 10 лет сейсмической активности очаговых зон Алтае-Саянской сейсмоактивной области (АССО), представляющих реальную опасность для южной и центральной части Красноярского края, вызвало необходимость создания эффективной системы сейсмического мониторинга на территории региона. В свою очередь создание сейсмологической сети на территории края и начало сейсмомониторинга повлекло за собой необходимость детальных неотектонических и сейсмогеологических исследований для решения актуальных задач оценки геодинамической опасности АССО. Значительные научные достижения в рамках долгосрочной оценки сейсмической опасности (разработка карт общего сейсмического районирования, ОСР-97, ОСР-97\*, ОСР-2012) только подчеркивают актуальность решения проблемы краткосрочной оценки сейсмической и геодинамической опасности для территории водохранилищ крупных ГЭС, расположенных южнее г. Красноярска.

В настоящее время в методологическом отношении признан приоритет методов среднесрочной оценки сейсмической опасности (месяцы, до 1–2 лет), которые, по экспертным оценкам, могут предсказывать до 80 % сильных землетрясений, но с некоторой неопределённостью (в сотни километров) по территориальной привязке.

Для обеспечения геодинамической безопасности населения и техногенных объектов промышленных агломераций региона, плотин и водохранилищ крупных ГЭС, необходимо осуществлять непрерывные сейсмические и геодинамические наблюдения, с использованием, как региональной сети сейсмических станций, так и системы локальных сетей геодинамического мониторинга. Широкое и обязательное использование локальных сейсмических сетей обуславливается их высокой чувствительностью к сейсмодинамическим процессам в земной коре, высокоточным определением координат эпицентров и глубин очагов землетрясений, возможностью картирования потенциальных очагов активизации и одновременно объемного (сейсмотомографического) моделирования геосреды по скоростным и энергетическим характеристикам сейсмических волн. Обеспечивая важную фактическую информацию о пространственно-временном поведении слабых землетрясений, локальная сейсмическая сеть становится незаменимым инструментом при оценке геодинамической опасности.

Информационной основой обеспечения геодинамической безопасности исследуемого региона являются результаты геомониторинга очаговых областей сильных землетрясений. В этой связи, важным является разработка новых методических подходов при организации регионального мониторинга естественных геофизических полей в рамках полигонных исследований на территории (АССО). При этом основной задачей является разработка аппаратного и методического обеспечения для контроля очаговой зоны подготовки сильного землетрясения и анализа низкоэнергетической составляющей сейсмического режима для изучаемой территории.

Таким образом, высокая геодинамическая опасность исследуемого региона подтверждает необходимость создания локальной мониторинговой сети для выделения интегральных предвестников-структур в записях регистрируемых геофизических

полях, сформированной как комплекс специальных наблюдений за особенностями сейсмического и электромагнитного режима в изучаемой очаговой зоне подготовки сильного землетрясения. Указанные исследования направлены на снижение возможных жертв и ущерба от землетрясений в рамках проведения последовательных мероприятий в области сейсмического районирования, оценок геодинамической обстановки и выполнения норм сейсмостойкого строительства, применительно к особо ответственным промышленным объектам.

*Геодинамический мониторинг сейсмоактивных зон.* За период 2009–2012 гг. геодинамического мониторинга сейсмоактивных зон Красноярского края получены следующие результаты:

- проведены сейсмогеологические исследования зон тектонических нарушений в южной части Красноярского края;
- разработана технология микросейсморайонирования в зонах активных разломов;
- выполнен анализ современных вертикальных движений земной поверхности Красноярского промрайона, включая территорию ГЭС;
- выполнен анализ современных вертикальных движений земной поверхности района Саяно–Шушенской ГЭС, результаты которого подтверждают своевременность и необходимость создания сейсмической сети определенной конфигурации;

На рисунок 1 представлена общая геодинамическая ситуация территории АССО и существующие системы сейсмического мониторинга.

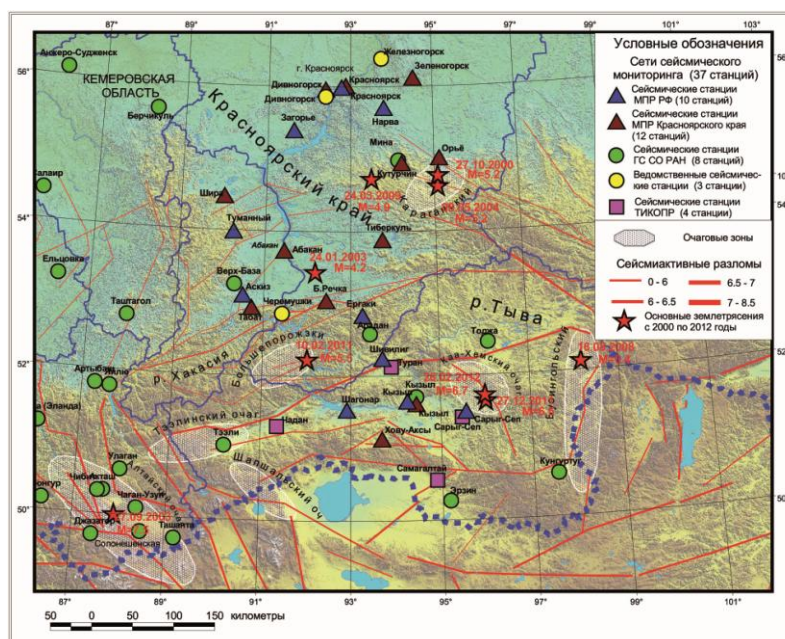


Рисунок 1 – Алтае–Саянская сейсмоактивная область.

В свою очередь авторами в результате проведенных исследований в 2009-2012 гг. выполнено обоснование необходимости создания геодинамического мониторинга в рамках полигонных исследований, которое позволяет решать задачу оценки параметров подготовки ожидаемого сильного землетрясения для выделенной очаговой области с целью оценки геодинамической опасности территории водохранилищ крупных ГЭС на реке Енисей. Разработанная схема полигонных исследований обеспечивает регистрацию геодинамических процессов на всей территории исследуемой области, что обеспечивается рациональным размещением пунктов наблюдений с минимальным уровнем микросейсмического фона для регистрации землетрясений с низкой магнитудой (рисунок 2).

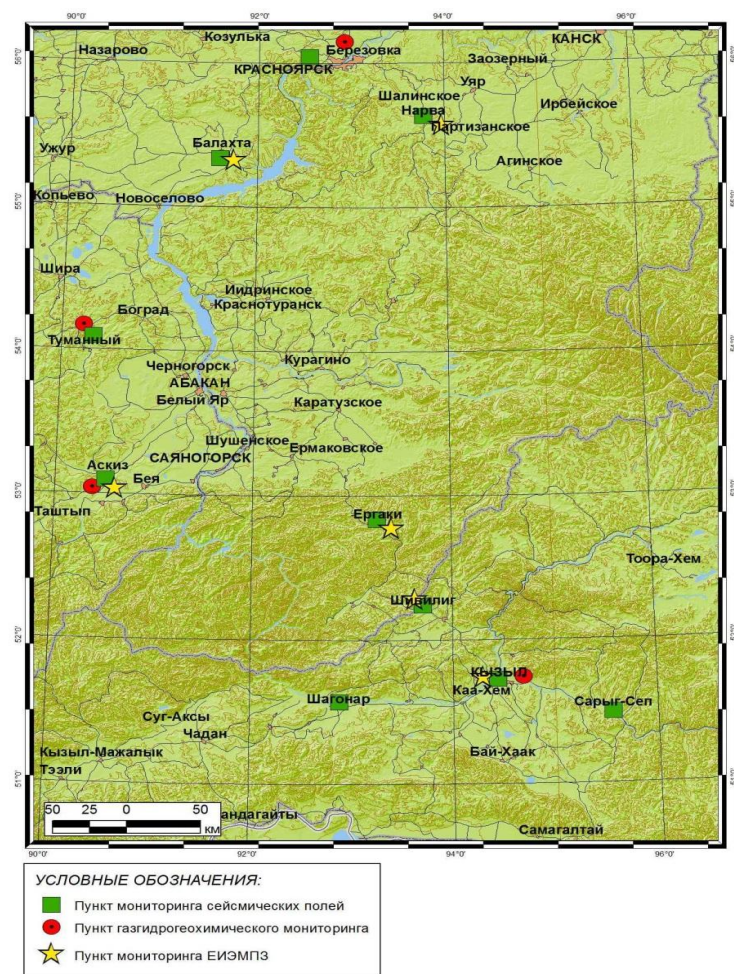


Рисунок 2 – Схема сети геофизического мониторинга на Алтае–Саянском полигоне вдоль системы водохранилищ крупных ГЭС на реке Енисей.

Предложенная и реализованная конфигурация расположения пунктов наблюдения, а также состав регистрирующей аппаратуры в этих пунктах в полной мере соответствуют необходимым условиям для качественной регистрации геофизических полей контролируемой территории для решения задачи оперативной и среднесрочной оценки геодинамической опасности в рамках полигонных исследований Алтае–Саянской сейсмоактивной области. В указанный период также создана система передачи данных наблюдений, которая обеспечивает оперативное получение данных мониторинга геофизических полей для целей оперативной оценки параметров подготовки сильного землетрясения в рамках полигонных исследований АССО.

*Оценка предвестников подготовки землетрясения 10 февраля 2011 г. с магнитудой 5,5.* По данным сейсмического мониторинга 10 февраля 2011 г. в 05:35:15 (по Гринвичу) зарегистрировано сейсмическое событие магнитудой 5,5 на юге Красноярского края.

Отметим, что предварительно в декабре 2010 г. выполнена оценка геодинамической опасности Алтае–Саянской сейсмоактивной области и выделена зона напряжённого состояния геологической среды в районе Тээлинского очага, с возможным сейсмическим событием магнитудой около 4,0 в февраль 2011 года (прогнозная зона № 2, ЭЦ РОПР). Фактически землетрясение произошло в 85 км северо–восточнее от центра прогнозной зоны, что соответствует точности, принятой в методике оценки местоположения ожидаемого сейсмического события  $\pm 100$  км. По оценке времени землетрясения прогноз совпал полностью. В тоже время, оценка магнитуды оказалась



заниженной по сравнению с фактической, так как при оценке использован более низкий энергетический уровень при анализе предвестника по сейсмическим данным. На основе анализа данных геомониторинга для выделенной очаговой зоны детально изучен процесс подготовки этого землетрясения и его афтершоковая последовательность.

В работе анализируется процесс подготовки этого сейсмического события в естественном импульсном электромагнитном поле Земли (ЕИЭМПЗ) на ст. Нарва (Столбы) и ст. Ергаки. За двое суток до события в поле ЕИЭМПЗ также наблюдалась аномалия в виде повышения уровня суточного хода сигнала, что являлось краткосрочным предвестником. Из данных наблюдений следует, что оценка магнитуды ожидаемого сейсмического события в 5,3 представлялась менее предпочтительной, чем оценка магнитуды в 4,1 (в декабре 2010 г.).

*Оценка предвестников подготовки землетрясения 27 декабря 2011 г. с магнитудой 6,5.* Оценка выполнена в конце ноября 2011 г. по данным сейсмического мониторинга. Так же как и в предыдущем случае при анализе данных подготовки землетрясения 27 декабря 2011 г. магнитудой 6,5 в Каа-Хемском районе Республики Тыва по данным сейсмического мониторинга выделена зона подготовки землетрясения, в сейсмическом сигнале проявился предвестник подготовки этого землетрясения в виде формирования «энергетического клина». По данным ЕИЭМПЗ на п.н. Шивилиг (160 км от эпицентра землетрясения) с 12 по 23 декабря 2011 г. зафиксирована амплитудная аномалия электромагнитной эмиссии, которая сменилась с 24 по 27 декабря резким снижением уровня ЕИЭМПЗ и землетрясением магнитудой 6,5 27 декабря 2011 г. Непосредственно перед землетрясением в сейсмическом очаге (за 8 часов до события 27 декабря) зафиксирован мощный электромагнитный предвестник. В целом выделенные аномалии указывает на расширение разломов в блоковой структуре, что и вызвало эти землетрясения.

*Анализ предвестников в газгидрогеохимическом поле.* При анализе краткосрочных предвестников для землетрясения 10 февраля 2011 г. на юге Красноярского края и землетрясения 27 декабря 2012 г. на территории Республики Тыва получили, что эмиссия радона в обоих случаях изменилась за 5-10 суток перед землетрясением во всех четырёх пунктах наблюдения («Красноярск», «Туманный», «Аскиз», «Кызыл»). В первом случае на п.н. Туманный, во втором – на п.н. Кызыл, наблюдались наиболее чёткие предвестники.

Выполнен сравнительный анализ предвестников (радон) подготовки землетрясений в Каа-Хемском районе 27 декабря 2011 г. с  $M=6,5$  и 26 февраля 2012 г. с  $M=6,7$ .

Во время подготовки землетрясении средне фоновая концентрация радона была на уровне 69,6, тогда как среднее значение концентрации радона в аномальный период первого землетрясения составила 88,2, второго – 86,0. Время предвестниковой радоновой аномалии оценивалось от начала устойчивого повышения концентрации радона величины  $2 \cdot S_{\text{фон}}$  (среднеквадратичное отклонение фоновых концентраций) до момента землетрясения и составило: в первом случае 5 суток, втором – 3 суток.

*Заключение.* В работе выполнен анализ геодинамической обстановки исследуемой территории АССО и существующих систем геомониторинга, а также основных подходов для обработки данных геодинамического мониторинга очаговых зон. Показано, что существующие системы геомониторинга и методическое обеспечение не позволяют решать проблемы оперативной и среднесрочной оценки геодинамической опасности, а также детальной оценки балла сотрясаемости от ожидаемых сильных землетрясений для территории водохранилищ крупных ГЭС. Представлены результаты геодинамического мониторинга очаговых зон АССО с использованием созданной системы наблюдений и обработки данных по выделению предвестников-структур подготовки сильных землетрясений, произошедших в 2011-2012 гг.